

FACULTAD DE INGENIERÍA



Carrera de Ingeniería de Minas

“ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS
HIDROMETALÚRGICOS EMPLEADOS PARA LA
LIMPIEZA DE CONCENTRADOS DE COBRE QUE
CONTIENEN ARSÉNICO”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autores:

Luis Miguel Lopez Sayaverde

Jorge Dalton Villalobos Mejia

Asesor:

Ing. Víctor Eduardo Alvarez León

Cajamarca - Perú

2021

DEDICATORIA

La presente tesis la dedico con amor y cariño a mis padres por su sacrificio y esfuerzo, por darme una carrera para mi futuro y por creer en mi capacidad. A mis hermanos quienes con sus palabras de aliento me motivaron y no dejaron decaer para seguir adelante y siempre sea perseverante y cumpla mis ideales. A nuestros compañeros y amigos presentes y pasados, quienes sin esperar nada a cambio compartieron sus conocimientos, alegrías y tristezas y a todas aquellas personas que durante estos cinco años estuvieron a mi lado apoyándome y lograron que este sueño se haga realidad.

Luis Miguel.

La presente tesis, la dedico con afecto, amor y cariño, a mis padres y abuelitos, quienes fueron y son el pilar más importante en mi vida, mi mayor fortaleza y la vez debilidad, por el amor incondicional, confianza, el apoyo, consejos y ánimos, por las enseñanzas para superar todos los retos de la vida y prepararme para enfrentarme a ella, por darme la oportunidad de ser alguien mejor y tener una carrera profesional a pesar de las adversidades desplegadas, hoy tengo la dicha de exhibir mi mayor logro ante ellos. La dedico también a mis hermanos, y primos que siempre estuvieron cuando necesité de ellos, por confiar en lo que era capaz de conseguir, regalarme tantas alegrías y estar en los momentos que necesitaba de ellos. Finalmente, a mis amigos, tanto de estudios como a los que trabajaron con mi persona durante mi adolescencia y parte de mi juventud, por las oportunidades y estima, por haber compartido sus conocimientos, alentarme a seguir adelante y darme la mano cuando necesite de ellos.

Jorge Dalton

AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradezco a Dios por brindarme salud y bienestar cada día, a mis padres por su enorme esfuerzo y confianza que tuvieron en mí, a mis hermanos, a mi familia que siempre me motivaron para salir adelante y a la Universidad Privada del Norte por haberme aceptado y ser parte de ella y abierto las puertas de su seno científico para poder estudiar, así también a los diferentes docentes que brindaron sus conocimientos y su apoyo para seguir adelante día a día. Y al finalizar, agradezco a mis compañeros de clases, ya que gracias al compañerismo, amistad y apoyo moral han aportado un alto porcentaje a mis ganas de seguir adelante.

Luis Miguel.

Agradezco a Dios, por la salud y vida, a la Universidad Privada del Norte, por acogernos entre sus aulas con los profesionales competentes para hacer crecer nuestros conocimientos y ser grandes profesionales, por consiguiente, agradezco a mis padres, por el gran esfuerzo que hicieron para lograr formarme profesionalmente, por sus sabios consejos, y confianza, a mis hermanos y familia que siempre me apoyaron, agradezco también a mi asesor de tesis, Ing. Víctor Eduardo Alvarez León, por estar siempre comprometido con nuestra investigación y por todos los conocimientos aportados durante la carrera, agradezco a todos los docentes que impulsaron con mi educación, los compañeros de la carrera, y amigos externos, por siempre colaborar, acompañar, y aconsejar en los momentos críticos de la vida universitaria y la vida social.

Jorge Dalton.

TABLA DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTO	3
ÍNDICE DE TABLAS.....	5
ÍNDICE DE FIGURAS.....	6
RESUMEN.....	7
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	8
1.1. Realidad problemática.....	8
1.2. Formulación del problema.....	26
1.3. Objetivos.....	26
1.4. Hipótesis.....	27
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA	28
2.1 Tipo de Investigación.....	28
2.2 Población y muestra.....	28
2.3 Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos.....	29
2.4 Procedimiento.....	31
2.5 Aspectos éticos.....	32
CAPÍTULO III. RESULTADOS.....	34
3.1. Descripción de los diferentes métodos hidrometalúrgicos empleados para la limpieza de concentrados de cobre que contienen arsénico.....	34
3.2. Comparación de los métodos hidrometalúrgicos más eficientes empleados para la limpieza de concentrados de cobre que contienen arsénico.....	45
3.3. Análisis de las características de los concentrados de cobre con mínimos contenidos de arsénico para su comercialización.....	47
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	48
REFERENCIAS	50
ANEXOS	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Lixiviación con solución alcalina con NaHS y NaOH.	34
Tabla 2 Porcentaje de remoción de arsénico en función a la concentración del agente lixiviante.....	35
Tabla 3 Porcentaje de remoción de Arsénico a diferentes temperaturas	36
Tabla 4 Porcentaje de remoción de arsénico a diferentes densidades de pulpa	37
Tabla 5 Comparativo del porcentaje de remoción de arsénico entre el concentrado gris inicial y final.	38
Tabla 6 Porcentaje de remoción de arsénico en función de la temperatura.	39
Tabla 7 Disolución del arsénico a diversas concentraciones (NaOH - Na ₂ S) vs tiempo. ...	39
Tabla 8 Porcentaje de remoción de arsénico con respecto al tiempo y Temperatura.	40
Tabla 9 Efecto de temperatura y tiempo de lixiviación alcalina.	40
Tabla 10 Efecto de la concentración de NaOH y Na ₂ S en la solución de lixiviación alcalina	40
Tabla 11 Ley de concentrado y recuperación del cobre de las pruebas de flotación.	41
Tabla 12 Ley de concentrado y recuperación del arsénico de las pruebas de flotación.....	42
Tabla 13 Porcentaje de disolución del Arsénico utilizando NaOH y Na ₂ S en la flotación.	42
Tabla 14 Porcentaje de disolución del arsénico a diversas revoluciones por minuto.	43
Tabla 15 Efecto del tamaño de partícula en la disolución de arsénico.	43
Tabla 16 Análisis químico promedio después de las pruebas experimentales.....	44
Tabla 17 Comparación de resultados iniciales y finales según el método estudiado y su cantidad de muestra.....	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Lista de los mercados importadores para un producto exportado por Perú: 2603 Minerales de cobre y sus concentrados.....	25
Figura 2. Comparación de los métodos de lixiviación para limpieza de concentrados de cobre con arsénico.....	45
Figura 3 Comparativo de los estudios de flotación en la limpieza de concentrados de cobre con arsénico.....	45
Figura 4. Comparativo del método más eficiente en la limpieza de concentrado de cobre con arsénico.	46

RESUMEN

La presente investigación “Análisis comparativo de los métodos hidrometalúrgicos empleados para la limpieza de concentrados de cobre que contienen arsénico”, utilizó el método de investigación del tipo aplicada, no experimental con diseño descriptivo, basado en un meta-análisis de la información contenida en los estudios previamente publicados entre los años 2009 al 2020. El objetivo de la investigación fue realizar el análisis comparativo de los métodos hidrometalúrgicos empleados para la limpieza de concentrados de cobre que contienen arsénico. La técnica utilizada fue el análisis documental, se realizó la búsqueda de información en revistas científicas, blocks, papers, libros, artículos científicos y tesis. La información obtenida, se tabuló y se realizaron graficas estadísticas utilizando el Excel, para poder analizar e interpretar los resultados. Se recolectó 39 investigaciones, de las cuales 6 se tomaron como referencia para los resultados y 33 fueron teóricas, que alimentan el valor informativo de la investigación; lográndose describir, analizar y deducir cada una de las investigaciones utilizadas. Se concluye que el método hidrometalúrgico empleado para la limpieza de concentrados de cobre que contienen arsénico más eficiente, es la lixiviación alcalina usando NaOH y Na₂S, ya que se logra una remoción del 97.8% de arsénico, en un tiempo de 5 minutos de prueba, usando una muestra de 20 gramos con la ley de cabeza de arsénico de 2.21% y ley final después de haber aplicado el método antes mencionado de 0.05%, que llevándose estos resultados a escala industrial, sería aceptable en la comercialización de concentrados de cobre, porque el concentrado final estaría dentro del rango de aceptación en lo que concierne a la cantidad de arsénico presente.

Palabras clave: Arsénico, Concentrado, Limpieza, Flotación, Lixiviación.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

El desarrollo de esta investigación se instruye a raíz de los problemas actuales que las empresas mineras vienen presentando, que principalmente se basa en describir los métodos empleados para la limpieza de concentrados de cobre que contienen arsénico procesados por flotación, con la finalidad de contribuir con la información sintética de la tecnología actual sobre el tema tratado (Ospino 2008).

En el ámbito internacional la comercialización de los metales se da en dos mercados que forman parte de una misma cadena que funciona de manera distinta. Por un lado, está un mercado donde interactúan las empresas operadoras de minas que producen concentrados quienes son los productores, y por otro lado están las refinerías de dichos concentrados que son los consumidores, lo que le caracteriza a este mercado, es que las empresas productoras de concentrados no cuentan con refinerías por lo que las obliga a comercializar sus concentrados, lo cual para negociar en este primer mercado el precio que se negocia es el costo de la maquila, que se basa en las características del concentrado como son; contenido del metal principal, metales secundarios, contaminantes como el arsénico e impurezas; los contratos de maquila incluye también un factor nombrado escalador, el cual disminuye el costo si la cotización del metal cae y lo eleva si este sube, lo que genera sensibilidad a cambios en el precio del metal (Ospino 2008).

En la comercialización de los concentrados de cobre, el arsénico es un metaloide altamente contaminante y tóxico que genera penalidades (deducciones), su presencia es muy nociva para el medio ambiente. En la metalurgia del cobre, sus límites permisibles no deben superar el 0,5 %; mayores contenidos durante los procesos de fusión de los

concentrados de cobre, pueden generar emisiones e incluso ocasionar degradación de los refractarios de los hornos; esto implica pérdidas cuantiosas en la fundición, es por ello que los concentrados de cobre que poseen elevados porcentajes de arsénico no pueden comercializarse o tienen alto costo de penalidad; este comentario es un artículo de la revista argentina SAM. (Bazán, 2015).

A nivel Mundial el arsénico está presente en más de 200 minerales incluyendo arseniuros, sulfuros, óxidos, arsenitos y sulfosales, que por lo general contienen cobre; para las empresas mineras exportadoras de cobre, el arsénico es un contaminante y en vez de generar ganancias, éste genera penalidades, es por ello que en el proceso metalúrgico se busca eliminar el 99% de arsénico para no tener problemas secundarios en la comercialización, pero en la actualidad solo se ha llegado a una eliminación del 90% lo cual sigue siendo un problema. (Landa, 2018).

Científicos de la Universidad de Akita, Japón estudiaron alternativas hidrometalúrgicas para tratar de eliminar el arsénico encontrados en los concentrados de cobre, probando diferentes medios lixiviantes como ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, sulfato férrico, cloruro férrico y cloruro de sodio, en condiciones de alta presión. El mineral utilizado (P80 de 45 micrones) proviene del depósito Chinkuwa-Taiwán (9,3% Cu y 12,3% As) y Nagano en Japón (10,4% Cu y 10,3% As). Lixiviado en un proceso de autoclave de 200ml a una temperatura de 160 °C y una presión de 10 atm por una hora con cada reactivo; La máxima tasa de disolución de Cu fue de 95,3% con una disolución de 18% de Arsénico, utilizando un medio de sulfato férrico con cloruro de sodio.

Por otro lado, se estudió el efecto de la disolución de enargita con la adición de iones y sulfuros de plata a la solución de lixiviación. Para los ensayos se utilizaron minerales de

tres países entre ellos, Huancavelica, Perú (enargita con contenido de plata); Kinkaseki, Taiwán (enargita con contenidos de calcopirita y sílice) y Superior, Arizona (enargita pura). Los análisis demostraron que la lixiviación con iones de plata mejora la disolución de enargita impidiendo la formación de la capa pasivante, formando una capa porosa de sulfuros de plata y/o permitiendo la reducción de enargita a calcosina obteniendo una disolución de cobre de 75% en 24 horas. (Miki, Iguchi, Hirajima, & K. 2016).

En Chile, la empresa minera Codelco es una de las pioneras en cuanto respecta investigaciones que tengan que ver con la mejora continua de los concentrados de cobre limpios de arsénico, tal es el caso del proyecto de lixiviación de concentrados de cobre PLCC, presentado en la empresa Ecometales Limited Filial Codelco, el cual consiste en la construcción de una Planta de lixiviación a presión, de concentrados de cobre que contienen de impurezas, principalmente Arsénico, usando la tecnología autoclave que es una tecnología hidrometalúrgico complementaria a la pirometalurgia, donde el proceso se caracteriza por una oxidación a alta presión y temperatura (POX) que genera una solución ácida rica en cobre (PLS) y un residuo arsenical estable, en el que según el proyecto antes mencionado, este proceso tiene una eficiencia en la recuperación de cobre mayor a 99.3%. (Ecometales Limited, 2019).

Actualmente en el Perú, existen numerosos yacimientos de Cobre donde la enargita es la mena principal portadora de Cobre y alto contenido de Arsénico; por lo tanto, estos yacimientos representan un serio reto a la metalurgia, ya que importantes depósitos de mineral asociados a la plata y el oro, cobrarían valor comercial y por consecuente beneficio económico para el país. (Riofrio, 2016).

El arsénico se encuentra presente en los concentrados de sulfuros de cobre, plomo, zinc y plata, se presentan generalmente en la tennantita ($\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$), enargita (Cu_3SO_4), arsenopirita (FeAsS) y otros. Este elemento afecta considerablemente el valor económico de los concentrados, por el alto castigo que le imponen las plantas fundidoras. Para los concentrados de cobre, plomo y plata el castigo es de \$3,00 Dólares por cada 0,1% de arsénico que sea mayor al 0,5%; mientras que, para los concentrados de zinc, este castigo es de \$ 1,00 Dólares por cada 0,1% Arsénico que es mayor a 0,1%. (Mayorca, 2018).

El Perú es el primer productor de plata y segundo en cobre, lo cual es el reflejo de la abundancia en recursos y la capacidad de producción de la actividad minera, que demuestra su gran potencial con grandes producciones obtenidos por diferentes métodos metalúrgicos. Según el MINEM en el año 2017 el Perú exportó un total de 3,035,461 TMF de cobre, con una concentración de 22,403 TMF de arsénico, en el año 2018, se logró exportar 3,035,397 TMF de cobre, con una concentración de 20,408 TMF de arsénico, y en el año 2019 se consiguió exportar 2,991,322 TMF de cobre, con una concentración de 24,915 TMF de arsénico. (Ministerio de Energía y Minas - Perú 2020). Los problemas con el arsénico se presentan en varias empresas mineras de nuestro país, tal es el caso de la compañía minera Chungar, el cual tiene grandes cantidades de arsénico en sus concentrados, generando así concentrados sucios para la comercialización, devaluando su precio de venta a las fundiciones. (Quijada & Carhuacusma, 2019).

La Compañía Minera Casapalca – Unidad Americana busca estudiar la posibilidad de separar selectivamente a los minerales que contienen arsénico del resto de los sulfuros de cobre, debido a que en el futuro el mineral de la zona Oeste de la empresa minera

antes mencionada, existen regiones con presencia de arsénico asociado con enargita teniendo desde ya un gran reto para separar el arsénico, buscando reducir el contenido promedio menos de 8000 ppm de As en los concentrados colectivos “bulk”. (Landa 2018).

La empresa minera Nazca, sobrelleva los problemas por el alto contenido de arsénico en sus concentrados, esto repercute en la comercialización de los mismos, ya que no puede eliminar las cantidades de arsénico presentes en el concentrado a comercializar, por tal motivo la empresa busca soluciones ante la problemática, realizando diferentes pruebas metalúrgicas para eliminar o reducir los contenidos de arsénico en su proceso. (Llerena, 2017).

La región Cajamarca cuenta con minerales de cobre que son exportados como concentrados, esto se debe a las características mineralógicas que tienen los yacimientos en la región antes mencionada, se puede asegurar que la enargita, bornita, cuprita son minerales ricos en cobre pero con altos contenidos de arsénico, actualmente existen empresas mineras operando en la región Cajamarca donde su mineral rico es obtenido por medio de la flotación, este tratamiento viene siendo utilizado desde varios años atrás tal es el caso de la empresa minera Goldfields ubicada en la provincia de Hualgayoc de la región Cajamarca, que ha logrado producir un aproximado de 775 Toneladas secas mensuales, llegando en algunos meses a más de 800 Toneladas de concentrados de Cobre para exportación, pero se presentan algunos problemas al momento de la recuperación de cobre por el alto contenido de arsénico. (Águila 2011).

En Goldfields en el año 2019 tuvieron una gran cantidad de arsénico en el tajo de extracción de mineral, lo que afectó la recuperación metalúrgica y la venta de los

concentrados producidos, el yacimiento tiene una franja natural de terreno con alto contenido de arsénico y cada vez que se vuelve a minar en dicha franja, se encuentran con altos contenidos de arsénico, lo cual la empresa se vio obligada a hacer una serie de cambios en el plan minero que tuvo un efecto en las flotas, costos, material, dosificación; es decir, se modificó todo, estas modificaciones se realizaron para atenuar el impacto y recuperar los niveles de minado esperado, logrando así una producción del 12 % más de cobre y 2 % más de oro de lo planeado; por otro lado en el 2019 se movió 1.5 de toneladas más de material con un costo más bajo, pero lo más importante es que se logró superar la presencia del arsénico, pirita amorfa y arcillas en los concentrados de cobre manteniendo la recuperación metalúrgica según lo presupuestado, también se logró colocar los materiales con arsénico en condiciones comerciales únicas, bien negociadas con los clientes, incluyendo grandes fundiciones en Alemania y Japón. Desde la dimensión ganancias, el flujo de caja libre fue de 78 millones de dólares, lo cual supera los 42 millones de dólares que habían planeado en el presupuesto, con una producción de cobre de 31,300 toneladas. (Reporte Integrado Goldfields 2019).

Por otro lado, en el proyecto minero la Granja, ubicado en la provincia de Chota, se tienen problemas similares lo cual el arsénico es un reto en la metalurgia del mismo, ya que el yacimiento en estudio es un pórfido de cobre y el mineral está asociado con el arsénico. Por lo que en dicho proyecto se vienen haciendo diferentes estudios de pruebas metalúrgicas para lograr obtener una tecnología de separación de arsénico apropiada, que permita poner en valor el yacimiento y el caso de negocio, cabe recalcar que la empresa minera tiene un plazo de ocho años, contados a partir del 2016, para llevar estos estudios a buen puerto. (Delgado 2016).

El proyecto minero La Granja está teniendo resultados favorables con lo que respecta a la recuperación de cobre con altos contenidos de arsénico, cuya evaluación se está desarrollando en Bundoora, Australia, en Technical Development Centre de Rio Tinto, lugar donde se investigan a los minerales que se extrae de los diversos yacimientos que tienen en el mundo, por lo cual están superando el reto metalúrgico que se tenía en el yacimiento del proyecto minero la granja, lo cual ahora buscan analizar su escala comercial de pruebas de laboratorio para determinar la rentabilidad del proyecto, mencionó María Alejandra Delgado, gerente general sede Perú de la empresa Australiana. (Delgado 2020).

El proyecto Michiquillay, según los estudios realizados ha encontrado impurezas de arsénico, lo que demanda una inversión “un poco mayor” a lo planeado. (América Economía 2017).

Para las muestras realizadas en el proyecto minero Michiquillay se utilizó catorce calicatas manejadas por la empresa Anglo American con la finalidad de determinar la calidad del suelo en cuanto al contenido total de metales pesados, detectaron excedencias en arsénico, cadmio, cobre, plomo y zinc, lo cual se tendría que asumir nuevos retos ante la problemática con el arsénico. (Llanos, 2016).

Los principales minerales de cobre con contenidos de arsénico se presentan en grandes cantidades en los depósitos de cobre, donde hay gran presencia de enargita (Cu_3AsS_4) y tennantita ($\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$).

La enargita es un sulfuro de cobre y de arsénico, que se presenta a veces en cristales de color gris con una punta rosácea y con brillo casi metálico. La exfoliación es evidente, casi perfecta en una dirección, y el carácter de sus cristales es prismático, a menudo

estriado en las caras finales. Fue descrita por primera vez en 1850 en Perú. Su nombre procede del griego “enarge”, que significa “distinto”, en alusión a su exfoliación. (Landa, 2018).

La enargita es difícil de remover de los concentrados de cobre por las técnicas convencionales de flotación ya que flota fácilmente con xantatos, esta tiene un índice de dureza de Mohs 3 y una gravedad específica de 4.4 g/cm^3 . Consiste en un mineral con 48.42% Cu, 19.02% As y 32.56% S y actúa como un semiconductor debido a un leve exceso estequiométrico de azufre. La enargita también puede contener cantidades menores de otros elementos como Hg y Sb. (Basurco, 2019).

La tennantita es un mineral de la clase de los minerales sulfuros, y dentro de esta pertenece al llamado “grupo de la tetraedrita”. Fue descubierta en 1819 en Cornualles (Inglaterra), Es un sulfuro de cobre con aniones adicionales de arseniuro. Químicamente es muy similar a la enargita. (Llerena 2017).

La Tennantita es el mineral de cobre que más abunda después de la enargita, con una composición de 48.50% Cu, 27.04% S, 18.82% As, 2.77% Fe, 2.44% Sb, generalmente entre crece con la calcopirita o esta bandeada con la esfalerita, galena o pirita; la tennantita se caracteriza por tener un color gris acero a negro, con una dureza en la escala de Mohs de 3 – 4, con sistema cristalino isométrico y brillo metálico. (Puga 2014).

Por otro lado, se tiene que tener en cuenta que en algunos minerales sulfuros como la calcopirita, calcosina, covelina, bornita, tennantita y enargita se presenta el Arsénico, pero hay que tener en claro que la enargita contiene grandes cantidades de cobre (48.3%) y a la misma vez Arsénico (19.1%) respectivamente, por lo que realizar su proceso

metalúrgico es un gran reto, al procesar grandes cantidades de este mineral, va a tener un efecto muy significativo en los concentrados finales, ya que se presenta problemas de contaminación causadas por los compuestos volátiles de arsénico emitidos desde las fundiciones; cabe recalcar que las fundiciones más estrictas se encuentran en Japón y Europa, por lo que estos países prefieren comprar concentrados con menos de 2000 ppm de Arsénico. (Méndez 2009).

Para la recuperación del mineral más abundantes del yacimiento se tiene que llevar a cabo los procesos metalúrgicos, donde sus operaciones se subdividen en dos grupos importantes cuales se caracterizan por sus operaciones, vía seca (operaciones pirometalúrgicas), o de vía húmeda (Operaciones hidrometalurgias); la principal característica de cada una de estas operaciones es que la pirometalurgia se realiza entre productos de estado, solido, liquido o gaseoso, mientras que en la hidrometalurgia se lleva a cabo a través de reacciones acuosas y a bajas temperaturas, cada una de ellas tienen sus características metalúrgicas extractivas. (Restrepo, Bustamante & Gaviria, 2008).

Los concentrados son el producto de diversos procesos al que ha sido sometido los minerales extraídos del tajo, estos procesos pueden ser, flotación, lixiviación, gravimetría, entre otros, cual objetivo es, separar la mayor parte de la ganga aliado mineral y recuperar los contenidos valiosos; Los concentrados llevan el nombre del mayor metal contenido, pudiendo ser concentrados de cobre, plomo, zinc y otros, por otro lado estos contienen el metal principal acompañado por otros elementos, además de materiales residuales, que en la negociación se convierten en elementos penalizables,

dependiendo de las condiciones operativas del comprador o refinería que procesará el concentrado. (Puga, 2014).

La hidrometalurgia es la rama de la metalurgia extractiva que estudia todos los procesos extractivos que ocurren en medios acuosos, que permiten la extracción y obtención de metales, mediante medios fisicoquímicos acuosos.

Una operación fundamental dentro de la hidrometalurgia es la lixiviación que tiene como objetivo la disolución en forma parcial o total de un sólido para recuperar algunas especies metálicas contenidas en él. En cualquier sistema de lixiviación es inevitable la co-disolución de otros elementos e impurezas, lo que genera soluciones poliónicas que deben ser purificadas antes de recuperar el elemento de interés desde las soluciones. (Sandoval 2020).

El proceso de lixiviación es un proceso metalúrgico donde los metales útiles suelen concentrarse en mezclas de grandes cantidades incluyendo metales indeseables; la lixiviación permite extraerlos en forma de sales solubles, por ejemplo; sales de cobre se lixivian de los minerales molidos que contienen otras sustancias por medio de soluciones de ácido sulfúrico; las sales de cobalto y níquel se lixivian de sus minerales con mezclas de ácido sulfúrico- amoníaco- oxígeno. (Puga, 2014).

Dentro del proceso de lixiviación se tiene la lixiviación con calcinas sulfatadas que se realiza a temperatura ambiente, sin necesidad de una planta de oxígeno. La cinética de reacción es rápida, con una alta recuperación. Tal como en otras alternativas, los metales preciosos pueden ser recuperados a través de procesos de cianuración. (Outotec, 2017).

Los compuestos sulfurados no pueden ser lixiviados directamente, es por ello que una tostación previa en lecho fluidizado, permite oxidar los contenidos de hierro a hematita y sulfatar los minerales de cobre y cobalto. La sulfatación permite que los compuestos sean disueltos en la etapa de lixiviación y recuperados a través de los procesos de extracción por solventes (Günter & Hammerschmidt, 2012).

Los procesos hidrometalúrgicos de lixiviación de concentrados de cobre pueden ser variados, de acuerdo a las tecnologías desarrolladas, los concentrados pueden ser tratados en pilas, bateas, reactores agitadores y reactores agitados a presión o autoclaves. Las principales variables en todas estas técnicas son la mineralogía, temperatura, presión, reactivos, catalizadores, bacterias y granulometría

Para el tratamiento de concentrados de cobre en el que la enargita está presente, se lleva a cabo un tratamiento que varían desde el uso de soluciones básicas, ácidas, alta temperatura, presión y la implementación de activación mecánica previo al tratamiento hidrometalúrgico, como es el caso de la lixiviación alcalina. (Jerez 2015).

Los procesos de lixiviación alcalina como los que usan hipoclorito de sodio (NaClO) o sulfuro de sodio (Na_2S), son buenas alternativas para disolver el arsénico presente en concentrados de cobre; la lixiviación alcalina con hipoclorito de sodio (NaClO - NaOH), disuelve el arsénico de la enargita para formar iones arsenato (AsO_4^{3-}), mientras que el cobre de la enargita se oxida a CuO sólido, sin embargo este proceso tiene una cinética rápida a presión ambiente, no es muy selectivo puesto que una fracción de los otros sulfuros de cobre también reaccionan, especialmente la covelina (CuS), cuya reactividad es similar a la de enargita en este medio, otra complicación de la lixiviación con

hipoclorito es que los minerales de antimonio, que generalmente también están presentes en los concentrados de cobre, no reaccionan en forma apreciable, la lixiviación con sulfuro de sodio tiene varias ventajas sobre la lixiviación con hipoclorito para la purificación de concentrados de cobre contaminados con arsénico, que son;

Mayor selectividad para la disolución de enargita sobre otros minerales de cobre.

Los residuos sólidos son apropiados para tratamiento directo por fusión.

Otras impurezas nocivas que usualmente están presentes en los concentrados de cobre, tales como minerales de antimonio y bismuto también se disolverán. (Ruiz, Bello & Padilla, 2013).

Por otro lado, en la metalurgia para la recuperación del cobre con altos contenidos de arsénico se encuentra el proceso de flotación, donde se puede alcanzar concentraciones mayores al 25% Cu, asimismo, más del 80% del cobre primario se produce por vías pirometalúrgicas, donde se basa en el proceso de tostación que es utilizado aproximadamente hace treinta años atrás donde se remueve algo del azufre aliado al cobre para preparar la carga y alimentarla a un horno de reverbero donde todo el Cu va a formar mata, que es un concentrado de metal parcialmente oxidado con algo de Fe. Mientras el resto de Fe, como FeO ayuda a escorificar la ganga produciendo una escoria baja en Cu, que se descarta.

El proceso de flotación constituye uno de los principales métodos de concentración de minerales actualmente en uso. Se basa en la diferencia de propiedades físico-químicas en la superficie de las especies mineralógicas, las cuales deben unirse a una fase gaseosa, en forma de burbujas. El fenómeno de flotación ocurre cuando este agregado partícula-

burbuja es lo suficientemente estable como para ascender a la superficie y salir como concentrado. El proceso de flotación es reiterado en varios ciclos, de manera que en cada uno de ellos se vaya produciendo un producto cada vez más concentrado. Adicionalmente, se puede realizar un segundo proceso de flotación, con el fin de recuperar el concentrado de otro mineral de interés o limpiarlo de alguna impureza. El procedimiento es igual que el anterior, pero utilizando reactivos y acondicionadores de pH distintos, lo que permite obtener concentrados de dos metales de interés económico. La primera flotación se denomina colectiva, donde el concentrado contiene dos o más componentes, y la segunda corresponde a una flotación selectiva, donde se efectúa una separación de compuestos complejos en productos que contengan no más de una especie individual. (Kracht, Vargas & Suazo, 2009).

Existen etapas en la flotación que se definen según el objetivo que quieren lograr, lo cual se encuentra detallado de la siguiente manera:

En primera instancia se tiene a la flotación primaria o rougher, este modelo está destinada a maximizar la recuperación y producir un relave lo más depuesto posible de los metales en interés.

En segunda instancia se encuentra la flotación Cleaner, cuya finalidad es maximizar las leyes de concentrado para alcanzar la pureza requerida en el producto final de la planta, lo que permite considerar más de una de estas etapas, que por lo general son nominadas como 1ª limpieza, 2ª limpieza, etc.

En tercera instancia se encuentra la etapa de flotación scavenger, siendo esta una etapa de recuperación, barrido o de agotamiento, destinada también a maximizar la

recuperación del mineral valioso y comercializable, es considerada como una etapa posterior al uso de las anteriores retratando sus relaves; Se habla entonces de: scavenger-cleaner o scavenger-rougher, según sea el caso. (Mayorca, 2018).

La flotación es el método más efectivo para la recuperación de concentrados de cobre y puede aplicarse a minerales de baja ley u minerales que requieran molienda fina para lograr la liberación, este es un proceso relativamente selectivo, por lo que se tiene que tener en cuenta la química del mineral y la del agua, ya que esto permite seleccionar los reactivos de flotación, y las cantidades a utilizar para obtener el concentrado lo más puro posible. (Marroquín 2013).

Dentro de la recuperación metalúrgica por flotación, se encuentra también la Flotación selectiva usando depresores, donde trata especialmente de la separación de diferentes minerales valiosos, o cuando existe un problema de selectividad, como es el caso de la obtención del cobre a partir de la enargita, donde la separación de enargita de otros minerales sulfuro de cobre es muy difícil si se usa depresores estándar, para este tipo de mineral se planteó hacer uso de un colector xantato, que utiliza cianuro de sodio y permanganato de potasio como depresores, dando resultados positivos ante la problemática y logrando la depresión de la enargita, siempre y cuando se lleve a cabo el proceso con las concentraciones apropiadas de cianuro de sodio y permanganato de potasio, de tal manera que se logra reducir el contenido de arsénico en los concentrados de cobre, pero el lado negativo de este método es que se reconocieron altas pérdidas de cobre asociadas. Tales pérdidas masivas no son sostenibles en aplicaciones industriales. La flotación selectiva de minerales arsénico-cobre puede separar minerales que contienen arsénico (enargita y tennantita) de otros sulfuros de cobre - hierro tales como, calcopirita

(CuFeS_2) covelita (CuS), calcocita Cu_2S , bornita (Cu_5FeS_4) y pirita (FeS_2) (Quijada, Carhuacuma, 2019).

La flotación selectiva se realiza cuando se tiene más de una especie mineralógica de interés, para obtener diferentes productos comercializables o separar especies contaminantes, es necesario introducir más de un circuito, para realizar una eficiente separación selectiva, en primera instancia se precede a separar la o las especies más abundantes que normalmente constituyen el relave. Con este fin se procede primero a separar un concentrado colectivo o bulk (en el que se encuentran las especies de interés) del relave. Se habla entonces de un circuito o planta de flotación colectiva, que está formada por las diferentes etapas de flotación. Al extraer al relave del circuito, el concentrado colectivo debe ser procesado en una o más plantas de flotación selectiva, constituidas por diversas etapas, donde el concentrado y el relave final corresponden a un producto y no a un material sin valor. (Alvarado, Plasencia 2016).

En los circuitos de la flotación selectiva consideran los 4 conjuntos de celdas de flotación como son; Rougher, Scavenger, primera y segunda limpieza, e incluso etapas de tercera y cuarta limpieza. En la práctica industrial la flotación selectiva se complementa con operaciones de lixiviación del cobre contenido, con el fin de obtener un producto comercial de mayor valor agregado, con una ley de cobre adecuada, y logrando en la etapa de flotación mejorar la recuperación del mismo.

El mineral alimentado a la Planta de Flotación Selectiva es de tamaño fino debido a la remolienda al cual es sometido en la etapa colectiva. Donde el mineral, en su mayoría, no mida más de 45 $[\mu\text{m}]$, correspondiente al pasante de la malla N° 325. Por otro lado, en la Planta de Flotación es posible medir en línea el porcentaje másico del Concentrado

Colectivo que se encuentra por sobre la malla N° 100 y el pasante de la malla N° 325. (Lobos 2015).

El proceso de flotación selectiva es sumamente sensible al pH, donde los reactivos de flotación. principalmente los colectores operan mejor en ciertos rangos de pH. La regulación del pH en la flotación de cobre se realiza con cal donde además de actuar como modificador de pH. es un depresor de pirita en la flotación selectiva de minerales de cobre en la etapa de limpieza. (Lupo, Utani 2014).

Al realizar los procesos metalúrgicos, el producto que se obtiene es el concentrado de cobre, el cual es una pulpa espesa obtenida de la etapa de flotación en el proceso productivo, en la que se encuentra una mezcla de sulfuro de cobre, fierro y una serie de sales de otros metales. Su proporción depende de la mineralogía de la mina. (Ministerio de Minería Chile, 2018).

Luego de todo un proceso metalúrgico, se obtiene el concentrado de cobre como producto, el cual es dirigido a fundición, y los relaves son transportados al tranque de relaves como desecho del proceso. Las principales pérdidas de agua en este proceso se producen por: evaporación, infiltración y proceso de secado, los acopios de concentrado, generalmente tienen una humedad cercana al 10% (100 litros de agua por tonelada de concentrado). (Garcés 2011).

Para el traslado y almacenamiento de los concentrados de cobre se debe de proveer a los depósitos de sistemas de lavado con agua a presión para toldos, tolva, vagones y neumáticos de los camiones antes de su salida, por otro lado, se debe de construir pozas de decantación, para recuperación de finos. (Ministerio de energía y Minas – Perú 2018).

Luego de haber obtenido el concentrado de cobre, para la recuperación económica, este producto tiene que ser negociado con los países importadores de este material, para luego transórmalos.

El primer país comprador de concentrados de cobre es la República China el cual exige un límite permisible máximo de 0,5 % del contaminante arsénico (As); siendo el mayor importador de minerales en el mundo, es autosuficiente en la producción de cobre; EE.UU. Debido a su estructura industrial altamente desarrollada; señala insuficiencia en su producción minera y de reciclaje; Japón: En las últimas 4 décadas, se ha convertido en importante comprador de minerales, manteniendo contratos de largo plazo para la compra de concentrados en especial de cobre y zinc; La Comunidad Europea: Muestra una producción de minerales de cobre, insuficientes para su requerimiento industrial. Este detalle, indica un importante mercado de importación de concentrados. (Llerena 2017).

La demanda del cobre mueve la economía en todo el país, y se relaciona directamente con los ingresos del PBI peruano, la magnitud de las inversiones en minería para cobre y sus exportaciones son la principal fuente de dinero para el gobierno, por otro lado, la demanda de cobre mundial se ve liderada por China, que tiene casi el 50% y después vienen otros países como Japón y Alemania, todos ellos altamente desarrollados. (Sagasti, Arboleda, 2019).

Se puede evidenciar en la siguiente imagen, un resumen de los principales países compradores de concentrados de cobre exportados por las empresas mineras del Perú en el rango de los años 2015 a 2019. (TARDEMAP 2021).

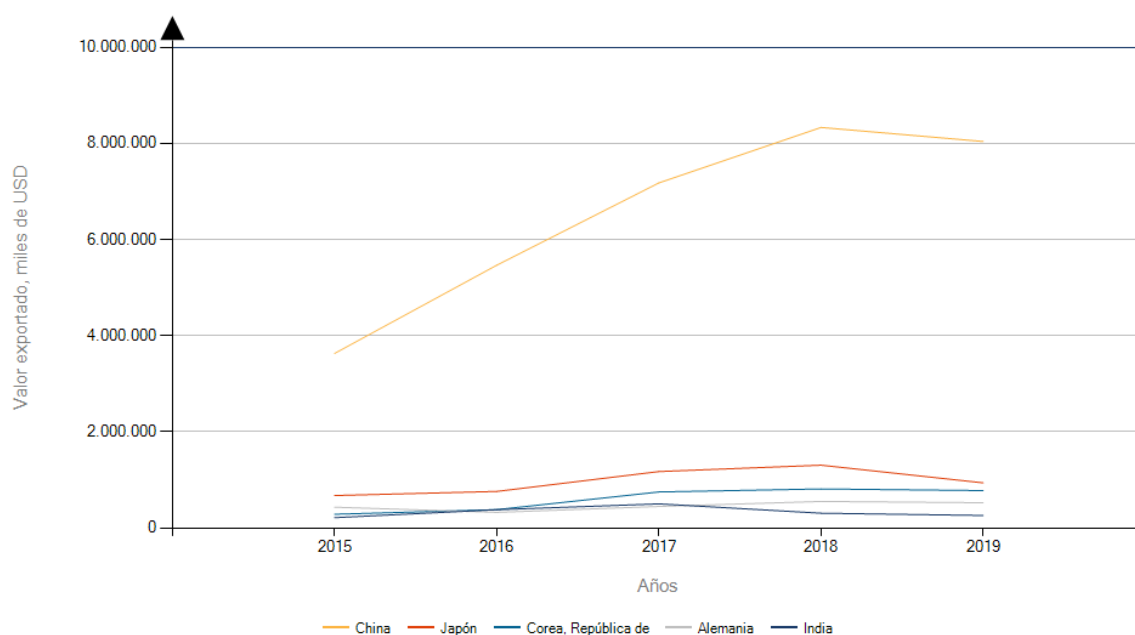


Figura 1. Lista de los mercados importadores para un producto exportado por Perú: 2603 Minerales de cobre y sus concentrados.

Nota. Esta figura demuestra la lista de los principales países importadores de minerales de cobre y sus concentrados, exportados del Perú desde el año 2015 hasta el año 2019.

Fuente: Trade Map, Estadísticas del comercio para el desarrollo internacional de las empresas.

El Perú en el año 2015 fue el tercer productor a nivel mundial de cobre, con una producción de cobre fino de 1,70 millones de toneladas métricas (alrededor del 9% del total mundial). De la cual la mayor parte se comercializo como concentrados de 1,63 millones de TM, dado que la producción de cátodos a través del proceso de extracción por solventes/electrodeposición solo consiguió 73.000 TM (pero representó el 20% de la producción total de cátodos). Hay que tener en cuenta que la capacidad para fundir y refinar cobre es limitada en el Perú, lo que se refleja en el alto porcentaje de la producción total que se destina a los concentrados. (Hanni, Podestá, 2019).

El presente proyecto de investigación se realiza, con la finalidad de analizar he identificar los diferentes métodos empleados para la limpieza de concentrados de cobre que

contienen arsénico, actualmente el arsénico en los concentrados de cobre es un gran problema para las empresas mineras que se dedican a explotar yacimientos cupríferos, por lo que nos motiva como investigadores a facilitar toda la información relacionada a la limpieza de concentrados de cobre, por otro lado se identifique el método más eficiente en lo que concierne a la limpieza de concentrados de cobre para poder aportar con la eficiencia en futuras investigaciones.

1.2. Formulación del problema

¿Cuál es el análisis comparativo de los métodos hidrometalúrgicos empleados para la limpieza de concentrados de cobre que contienen arsénico?

1.3. Objetivos

Objetivo general

Realizar el análisis comparativo de los métodos hidrometalúrgicos empleados para la limpieza de concentrados de cobre que contienen arsénico.

Objetivos específicos

- Describir los diferentes métodos hidrometalúrgicos empleados para la limpieza de concentrados de cobre que contienen arsénico.
- Comparar los métodos hidrometalúrgicos más eficientes empleados para la limpieza de concentrados de cobre que contienen arsénico.
- Analizar las características de los concentrados de cobre con mínimos contenidos de arsénico para su comercialización.

1.4. Hipótesis

Hipótesis general

- Los métodos hidrometalúrgicos de flotación selectiva y lixiviación alcalina, son los que presentan mejores resultados en la limpieza de concentrados de cobre que contienen arsénico.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1 Tipo de Investigación

La investigación es aplicada, no experimental, descriptiva, ya que se pretende realizar detalles de los métodos empleados para la limpieza de concentrados de cobre que contienen arsénico.

La investigación aplicada se caracteriza porque el problema está establecido y es conocido por el investigador, por lo que utiliza la investigación para dar respuesta a preguntas específicas. (Rodríguez, 2020). Por otro lado, se basa en el uso del conocimiento y los resultados de la investigación para dar una forma rigurosa, organizada y sistemática de conocer la realidad. (Murillo, 2008).

La investigación según su manipulación de variables es no experimental, ya que se realiza sin manipular deliberadamente variables, y se observa los eventos tal como se dan en su contexto natural, para analizarlos. (Hernández, Fernández y Baptista, 2014).

La investigación descriptiva considera la realidad de los hechos y su correcto análisis e interpretación. (Blanco, 2018). De tal forma que en la investigación se tomará como base la información de diferentes fuentes, respecto a los métodos hidrometalúrgicos empleados para la limpieza de concentrados de cobre que contienen arsénico.

2.2 Población y muestra

2.2.1 Población

Métodos metalúrgicos empleados para la limpieza de concentrados de cobre que contienen arsénico.

2.2.2 Muestra

Métodos hidrometalúrgicos empleados para la limpieza de concentrados de cobre que contienen arsénico.

2.3 Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos

2.3.1 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La técnica utilizada fue el análisis documental. Se realizó la búsqueda de información en Revistas científicas, Blocks, Papers, Libros, Artículos Científicos y Tesis. Se utilizaron los siguientes instrumentos de recolección de datos.

Instrumento 1: Formato para lixiviación con solución alcalina con NaHS y NaOH.

Instrumento 2: Formato para porcentaje de remoción de arsénico en función a la concentración del agente lixivante.

Instrumento 3: Formato para porcentaje de remoción de arsénico a diferentes temperaturas.

Instrumento 4: Formato para remoción de arsénico a diferentes densidades de pulpa.

Instrumento 5: Formato comparativo del porcentaje de remoción de arsénico entre el concentrado de cobre gris inicial y final.

Instrumento 6: Formato para porcentaje de remoción de arsénico en función de la temperatura

Instrumento 7: Formato para disolución del arsénico a diversas concentraciones (NaOH - Na₂S) vs tiempo.

Instrumento 8: Formato para porcentaje de remoción de arsénico con respecto al tiempo y Temperatura.

Instrumento 9: Formato para efecto de temperatura y tiempo de lixiviación alcalina.

Instrumento 10: Formato para efecto de la concentración de NaOH y Na₂S en la solución de lixiviación alcalina.

Instrumento 11: Formato para ley de concentrado y recuperación del cobre de las pruebas de flotación.

Instrumento 12: Formato para ley de concentrado y recuperación del arsénico de las pruebas de flotación.

Instrumento 13: Formato para porcentaje de disolución del Arsénico utilizando NaOH y Na₂S en la flotación.

Instrumento 14: Formato para porcentaje de disolución del arsénico a diversas revoluciones por minuto.

Instrumento 15: Formato para efecto del tamaño de partícula en la disolución de arsénico.

Instrumento 16: Formato para análisis químico promedio después de las pruebas experimentales.

Todos estos instrumentos están ubicados en el anexo N° 1.

2.3.2 Técnicas e instrumentos de análisis de datos

La información obtenida, se tabuló y se realizaron graficas estadísticas utilizando el Excel, para poder analizar e interpretar los resultados. Los instrumentos utilizados para el análisis de datos fueron los siguientes:

Instrumento 17: Comparación de los métodos de lixiviación para limpieza de concentrados de cobre con arsénico.

Instrumento 18: Comparativo de los estudios de flotación en la limpieza de concentrados de cobre con arsénico.

Instrumento 19: Comparativo del método más eficiente en la limpieza de concentrado de cobre con arsénico.

Todos estos instrumentos están adjuntados en el anexo N° 2.

2.4 Procedimiento

Etapas 1

Búsqueda de información

La investigación se realizó identificando temas que guarden similitud con lo que se está investigando, cuya finalidad de poder consolidar la información de otros investigadores.

Para ello se utilizó buscadores virtuales de información tales como: Scielo, Redalyc, Google Académico, Ebsco, Repositorio de universidades.

Etapas 2

Análisis de resultados

Se recopiló los datos obtenidos de las investigaciones con lo cual se procedió a analizar y comparar los diferentes resultados, haciendo uso de Microsoft Excel.

Etapas 3

Discusión de resultados y Conclusiones

Se realizó el análisis de los resultados obtenidos con el fin de poder discutirlos con los antecedentes presentados. En las conclusiones se determinó el método hidrometalúrgico más eficiente, que guardan relación con la limpieza de concentrados de cobre que contienen arsénico.

Etapas 4

Elaboración de tesis

Se realizó la lectura desde el capítulo 1, en dos a tres veces el material colocado en este documento. Luego se colocó los resultados de forma sistematizada, lógica y objetiva, con el fin de dar solución al problema planteado. Las conclusiones fueron contextualizadas utilizando el método científico. Para la redacción de la tesis se utilizó el Microsoft Word.

2.5 Aspectos éticos

La investigación se realizó de acuerdo a los estándares que utiliza la Universidad Privada del Norte, en tal sentido los autores estamos sujetos a cumplir la normatividad institucional, que rige una investigación con derechos de autor.

Las fuentes y hallazgos publicados en el presente trabajo, brindarán información abierta y completa en beneficio de la comunidad científica e investigadora; la cual servirá de

base para futuras y nacientes investigaciones, proporcionando la publicación de manera virtual en páginas propias de la Universidad Privada del Norte.

CAPÍTULO III. RESULTADOS

3.1. Descripción de los diferentes métodos hidrometalúrgicos empleados para la limpieza de concentrados de cobre que contienen arsénico.

Tabla 1

Lixiviación con solución alcalina con NaHS y NaOH.

Prueba Experimental	Temperatura (°C)	Presión (Atmosferas)	pH	NaHS (g/l)	NaOH (g/l)	Tiempo de Lixiviación (Horas)	Concentración de arsénico (%)		% de remoción de arsénico
							inicial	final	
1	80	1	12.5	50	200	1.5	1	0.20	80.00
2	80	1	12.5	50	200	2.0	2	0.20	90.00
3	80	1	12.5	50	200	2.5	3	0.25	91.67
4	80	1	12.5	50	200	3.0	4	0.35	91.25
5	80	1	12.5	50	200	4.0	5	0.40	92.00
6	80	1	12.5	50	200	6.0	8	0.50	93.75
7	80	1	12.5	50	200	8.0	10	0.50	95.00
8	80	1	12.5	50	200	10.0	12	0.50	95.83

Nota. La tabla muestra los parámetros tomados en cuenta en la operación para limpieza de un concentrado de cobre con el método de lixiviación, utilizando NaHS y NaOH, donde se trabajó con granulometría promedio 80% tamizado en una malla número 150, con una dilución 1 sólido/3 líquido, se puede mostrar que a una temperatura constante de 80 °C a presión atmosférica, y a un pH de 12.5, a medida que se incrementa el tiempo de lixiviación, utilizando NaHS y NaOH, se logró incrementar el porcentaje de remoción de arsénico en 10 horas hasta un porcentaje de 95.83%.

Tabla 2

Porcentaje de remoción de arsénico en función a la concentración del agente lixivante

Tiempo (Horas)	Concentración(g/l)							
	(Na ₂ S - NaOH) (96-49.2)		(Na ₂ S - NaOH) (110-56.4)		(Na ₂ S - NaOH) (140-71.8)		(Na ₂ S - NaOH) (160-82.1)	
	%As Final	%Remoción	%As Final	%Remoción	%As Final	%Remoción	%As Final	%Remoción
0	2.82	0.00	2.82	0.00	2.82	0.00	2.82	0.00
7	1.53	45.70	0.97	65.60	0.93	67.00	0.84	70.20
8	1.49	47.20	0.95	66.30	0.64	77.30	0.69	75.50
9	1.44	48.90	0.93	67.00	0.47	83.30	0.50	82.30
10	1.25	55.70	0.86	69.50	0.25	91.10	0.30	89.40

Nota. La tabla muestra la concentración de soluciones químicas que se utilizaron en las pruebas metalúrgicas para limpieza de un concentrado de cobre gris, usando el método de lixiviación alcalina, el cual el resultado más óptimo en el porcentaje de remoción de arsénico fue en un tiempo de 10 horas, utilizando el agente lixivante de Na₂S - NaOH (g/l) con relación de 140-71.8, obteniendo una remoción de 91.10% de arsénico.

Tabla 3

Porcentaje de remoción de Arsénico a diferentes temperaturas.

Tiempo (horas)	Temperatura 70 °C		Temperatura 80 °C		Temperatura 85 °C		Temperatura 90 °C	
	% As Final	% Remoción	% As Final	% Remoción	% As Final	% Remoción	% As Final	% Remoción
0	2.82	0.00	2.82	0.00	2.82	0.00	2.82	0.00
7	1.35	52.10	0.97	65.60	1.13	59.90	0.93	67.00
8	1.20	57.40	0.93	67.00	1.02	63.80	0.64	77.30
9	1.15	59.20	0.82	70.90	0.82	70.90	0.47	83.30
10	1.09	61.30	0.74	73.80	0.69	75.50	0.25	91.10

Nota. La tabla muestra los parámetros tomados en cuenta en las pruebas metalúrgicas para limpieza de un concentrado de cobre gris, usando el método de lixiviación alcalina, como se puede observar a medida que se incrementa el tiempo de lixiviación y la temperatura, también se incrementa el porcentaje de remoción de arsénico, hasta un tiempo de 10 horas, y una temperatura de 90 °C, se obtiene un porcentaje de remoción del 91.10%.

Tabla 4

Porcentaje de remoción de arsénico a diferentes densidades de pulpa.

Relación L/S	%As Final	% Remoción
2	0.54	80.9
3	0.45	84.0
4	0.52	81.6

Nota. La tabla muestra la remoción de arsénico a diferentes densidades de pulpa que se utilizaron en las pruebas metalúrgicas para limpieza de un concentrado de cobre gris, usando el método de lixiviación alcalina, los parámetros de operación de la prueba fueron: Na_2S (160 g/L) - NaOH (82.1 g/L) con temperatura de 90 °C y en 9 horas con una concentración inicial de arsénico del 2.82%.

Tabla 5

Comparativo del porcentaje de remoción de arsénico entre el concentrado gris inicial y final.

	%As	%Sb	Hg (ppm)	%Bi	%Cu	Oz/TM Ag	Oz/TM Au	%Zn	%Pb	%S
Inicio	2.82	1.04	21.00	0.92	25.45	78.43	0.62	5.60	3.20	30.34
Lixiviación	0.25	0.12	6.57	0.83	25.55	77.81	0.69	4.29	3.20	30.09
Δ	2.57	0.92	14.43	0.09	-0.10	0.62	-0.07	1.31	0.00	0.25
% Δ	91.13	88.46	68.71	10.08	-0.39	0.79	-11.29	23.39	0.00	0.82

Nota: La tabla muestra un resumen de la remoción de arsénico y otros metales; las condiciones más óptimas con relación a Líquido/Sólido igual a 2, Temperatura de lixiviación de 90 °C, concentración de Na₂S 140 g/L y NaHS 71.8 g/L en un tiempo de 10 horas para limpieza de un concentrado de cobre gris, usando el método de lixiviación alcalina, se presenta con una remoción óptima de 91.13%.

Tabla 6

Porcentaje de remoción de arsénico en función de la temperatura.

Temperatura (°C)	Ley de As (%)	Ley de Relave As (%)	% de remoción As	RPM	Dosificación de NaOH (Mol)	Dosificación de Na ₂ S (Mol)
70	5.80	0.25	95.75	750	3.50	1.00
80	5.80	0.19	96.79	750	3.50	1.00
90	5.80	0.16	97.30	750	3.50	1.00

Nota. Esta tabla muestra la extracción del arsénico a diferentes grados de temperatura y a una velocidad de agitación constante, usando una solución de NaOH (mol) y Na₂S (mol) en un concentrado de enargita, como se puede observar a una temperatura de 90 °C, se obtiene una óptima remoción del 97.30% de arsénico.

Tabla 7

Disolución del arsénico a diversas concentraciones (NaOH - Na₂S) vs tiempo.

Tiempo (Horas)	Ley de As (%)	Ley de Relave As (%)	Extracción As (%)
2	5.80	0.29	96.12
3	5.80	0.19	96.67
4	5.80	0.17	97.05

Nota. Esta tabla muestra los valores promedio de extracción de arsénico en función del tiempo en un concentrado de enargita.

Tabla 8

Porcentaje de remoción de arsénico con respecto al tiempo y Temperatura.

Tiempo (Horas)	Temperatura (°C)		
	70	80	90
2	95.43%	96.19%	96.73%
3	95.76%	96.79%	97.46%
4	96.06%	97.37%	97.73%

Nota. Esta tabla muestra los valores de remoción de Arsénico en función del tiempo y temperatura en un concentrado de enargita, donde se puede evidenciar que la mayor remoción de arsénico se da en un tiempo de 4 horas con una temperatura de 90 °C, removiendo un total de 97.73% de arsénico.

Tabla 9

Efecto de temperatura y tiempo de lixiviación alcalina.

Volumen de Solución (ml)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Remoción As (%)	Residuo As (%)	RPM
5	95	5	95.70	0.10	370
5	70	10	86.10	0.32	370

Nota. Esta tabla muestra el efecto de temperatura y tiempo de lixiviación alcalina para la remoción de arsénico en un concentrado de cobre con contenido de enargita, usando una muestra de 20 gramos.

Tabla 10

Efecto de la concentración de NaOH y Na₂S en la solución de lixiviación alcalina.

Volumen Solución (ml)	Temperatura °C	Tiempo (Minutos)	Dosificación de Na ₂ S (Mol)	Dosificación de NaOH (Mol)	Remoción As (%)	RPM
4	80	5	10.00	4.0	97.80	370
4	80	5	1.25	0.5	83.20	370
4	80	10	6.00	3.0	94.00	370

Nota: Esta tabla muestra el efecto de la temperatura, tiempo, velocidad de agitación y dosificación de Na_2S y NaOH en la lixiviación alcalina para la remoción de arsénico, en un concentrado de cobre con contenido de enargita usando una muestra de 20 gramos.

Tabla 11

Ley de concentrado y recuperación del cobre de las pruebas de flotación.

Prueba de Flotación.	Ley de cobre (%)	Leyes Químicas (% Cu)			Recuperaciones (% Cu)		
		1° L.	2° L.	Relave	1° L.	2° L.	Relave
5	2.30	14.56	18.04	0.08	88.43	81.44	2.18
6	2.14	10.48	12.98	0.08	95.08	91.51	7.38
7	2.13	12.88	15.36	0.06	87.82	79.51	1.08

Nota: En esta tabla se muestra los resultados más eficientes de un proceso de flotación selectiva de minerales de cobre, en cada prueba se realizó cuatro procesos de la flotación, primero se considera una etapa de molienda, segundo se realiza la flotación Rougher, tercero pasa por una flotación Scavenger, cuarto se lleva a cabo la primera y segunda limpieza de tal forma que se obtiene los resultados mostrados en la tabla. La dosificación de reactivos para estas tres pruebas de flotación se detalla en el anexo N° 3.

Tabla 12

Ley de concentrado y recuperación del arsénico de las pruebas de flotación.

Prueba de flotación.	Ley de Arsénico (%)	Leyes Químicas (% As)			Recuperaciones (% As)		
		1° L.	2° L.	Relave	1° L.	2° L.	Relave
5	0.89	5.33	6.05	0.08	83.33	76.02	5.84
6	0.81	4.84	5.33	0.08	92.2	90.58	3.02
7	0.83	4.88	5.88	0.07	85.2	78.17	3.23

Nota: En esta tabla se muestra los resultados más eficientes de un proceso de flotación selectiva de minerales de Arsénico, en cada prueba se realizó cuatro procesos de la flotación, primero se considera una etapa de molienda, segundo se realiza la flotación Rougher, tercero pasa por una flotación Scavenger, cuarto se lleva a cabo la primera y segunda limpieza de tal forma que se obtiene los resultados mostrados en la tabla. La dosificación de reactivos para estas tres pruebas de flotación se detalla en el anexo N° 3.

Tabla 13

Porcentaje de disolución del Arsénico utilizando NaOH y Na₂S en la flotación.

Prueba N°	NaOH (Mol/litro)	Na ₂ S (Mol/litro)	Disolución de As (%)		
			5 (min)	10 (min)	20 (min)
1	3.5	1.0	0.3	0.7	1.15
2	3.0	0.5	0.4	0.8	1.00
3	2.0	1.0	0.4	0.9	1.50
4	1.0	1.0	0.2	0.5	0.80
5	1.5	0.5	0.3	0.6	0.90

Nota: Esta tabla muestra la disolución del arsénico aplicando reactivos de NaOH y Na₂S a diferentes tiempos, en proceso de flotación de mineral de cobre, se observa en la prueba número 1 que a una concentración de 3.5 (mol/Litro) de NaOH, y 1 (mol/litro) Na₂S a un tiempo de 20 minutos se obtiene la mayor disolución del arsénico con 1.15% en la flotación del cobre.

Tabla 14

Porcentaje de disolución del arsénico a diversas revoluciones por minuto.

Prueba N°	RPM	Disolución de As (%)		
		5 (min)	10(min)	20 (min)
1	100	0.3	0.6	1.1
2	200	0.3	0.5	1.0
3	300	0.6	1.1	1.5
4	400	0.5	0.9	1.6
5	500	0.5	1.1	2.0

Nota: Esta tabla muestra la disolución del arsénico aplicando velocidad a diferentes tiempos, en proceso de flotación de mineral de cobre, se puede observar que en la prueba N° 5, a mayor velocidad de agitación para la disolución del Arsénico 500 RPM, en 20 minutos se obtiene el mayor porcentaje de disolución de Arsénico con 2.0%.

Tabla 15

Efecto del tamaño de partícula en la disolución de arsénico.

Prueba N°	Tamaño de Partícula (Micrones)	Disolución de As (%)		
		5 (min)	10 (min)	20(min)
1	100	0.3	0.7	1.1
2	74	0.4	0.9	1.5
3	37	0.6	1.2	2.0

Nota: Esta tabla muestra la disolución del arsénico según el tamaño de partícula a diferentes tiempos, en el proceso de flotación de mineral de cobre. Donde se evidencia que a menor tamaño de partícula 37 micras en un tiempo de 20 minutos se obtiene el mayor porcentaje de disolución de arsénico con el 2.0%.

Tabla 16

Análisis químico promedio después de las pruebas experimentales.

Mineral	Antes de tratamiento	Después de tratamiento	Disolución (%)
Cu	24.6	27.2	
Fe	26.5	24.3	8.30
As	3.3	2.23	32.42
Sb	1.7	0.9	47.05
Ag Oz/TC	87.2	91.3	

Nota. Esta tabla muestra la comparación de los resultados iniciales (antes de aplicar el método de flotación), con los resultados finales (después de aplicar el método de flotación) de minerales de cobre con arsénico. Se observa que se ha disuelto el 32.42% del arsénico en la flotación, debido a la dosificación de NaOH y Na₂S variando la velocidad de agitación y el tiempo.

3.2. Comparación de los métodos hidrometalúrgicos más eficientes empleados para la limpieza de concentrados de cobre que contienen arsénico.

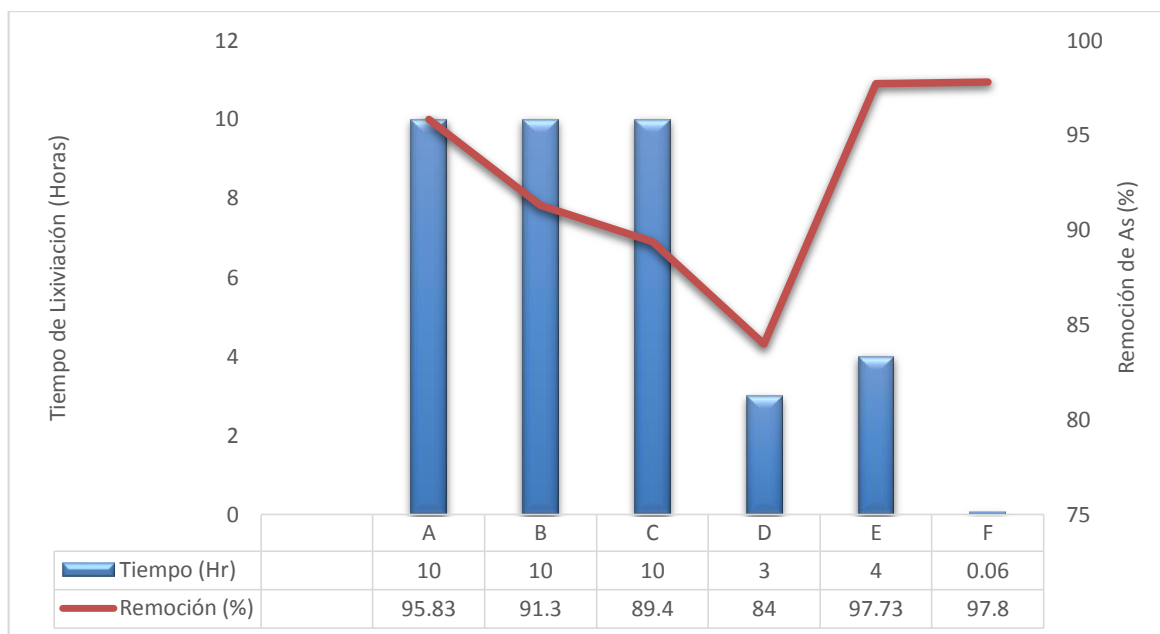


Figura 2. Comparación de los métodos de lixiviación para limpieza de concentrados de cobre con arsénico.

Nota. Esta figura demuestra los resultados de los estudios analizados en lo que refiere a la limpieza de concentrados de cobre con contenido de arsénico, usando el método de lixiviación. Donde “A” es la Lixiviación alcalina con NaHS; “B” es Remoción de arsénico a diferentes temperaturas; “C” es el Nivel de remoción de arsénico con agente lixivante; “D” es la Remoción de arsénico a diferentes densidades de pulpa; “E” es Extracción de arsénico (%) con respecto al tiempo y Temperatura; “F” es el Efecto de la concentración de NaOH y Na₂S en la solución de lixiviación Alcalina.

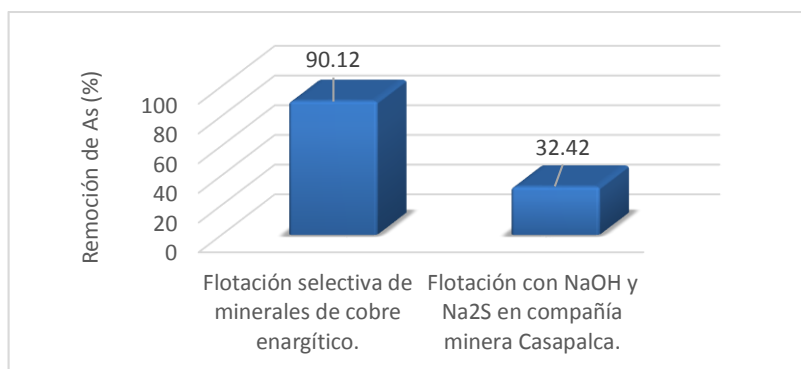


Figura 3 Comparativo de los estudios de flotación en la limpieza de concentrados de cobre con arsénico.

Nota. Esta figura muestra los resultados de los estudios analizados en lo que refiere a la limpieza de concentrados de cobre con contenido de arsénico. Se evidencia que la flotación selectiva tiene mejores resultados en la remoción de arsénico con el 90.12%, mientras que la flotación convencional solo alcanza el 32.42% de remoción de arsénico.

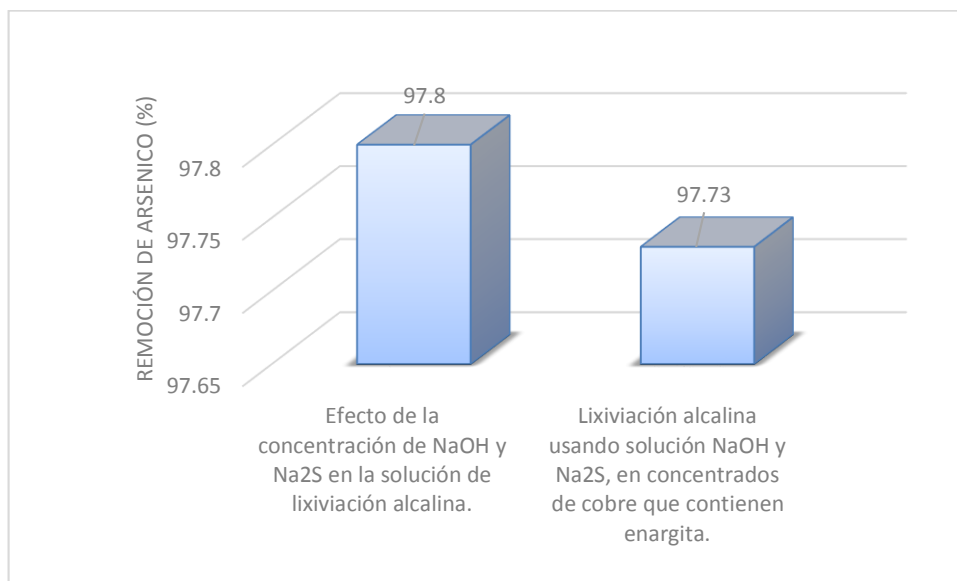


Figura 4. Comparativo del método más eficiente en la limpieza de concentrado de cobre con arsénico.

Nota. Esta figura muestra el comparativo de los dos mejores métodos utilizados para la limpieza de concentrado de cobre con arsénico. Se evidencia que el método más eficiente en la remoción de arsénico es la lixiviación alcalina usando solución de NaOH Y Na₂S, alcanzando valores de 97.8% de remoción de arsénico.

3.3. Análisis de las características de los concentrados de cobre con mínimos contenidos de arsénico para su comercialización.

Tabla 17

Comparación de porcentajes de remoción de arsénico en función del método aplicado.

Método utilizado	% As inicial	% As Final	% de Remoción	Cantidad de muestra (g)
Lixiviación alcalina con NaHS y NaOH en minera Nazca.	12	0.50	95.83	10000
Lixiviación alcalina utilizando NaOH y Na ₂ S en concentrado de cobre gris del centro del Perú.	2.82	0.25	91.13	500
Lixiviación alcalina en caliente utilizando NaOH y Na ₂ S en un concentrado de enargita.	5.80	0.13	97.73	20
Lixiviación alcalina usando solución NaOH y Na ₂ S, en concentrados de cobre que contienen enargita.	2.21	0.05	97.80	20
Flotación selectiva de minerales de cobre enargítico.	0.81	0.08	90.12	1100
Flotación con NaOH y Na ₂ S en compañía minera Casapalca.	3.3	2.23	32.42	23.5

Nota. De los 6 métodos analizados se observa que la adición de NaOH y Na₂S en la solución de lixiviación alcalina y la lixiviación alcalina en caliente usando solución de NaOH y Na₂S alcanzan las más altas remociones de arsénico con 97.80% y 97.73% respectivamente.

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1 Discusión:

De los métodos hidrometalúrgicos empleados para la limpieza de concentrado de cobre, cuya información fue recolectada de revistas especializadas, tesis, libros; se han descrito seis métodos referentes al tema de investigación, tal como se muestra en la tabla número 17.

Según los resultados de la investigación titulada. Remoción de arsénico desde concentrados de cobre que contienen enargita, elaborado por Ruiz, Bello y Padilla en el año 2013, investigando el efecto de la concentración de NaOH y Na₂S en la solución de lixiviación alcalina, con una muestra de 20 g de mineral contaminado con 2.23% de ley de cabeza de arsénico, el método fue efectivo, ya que se removió el 97.8% del arsénico, quedando en el concentrado 0.05%.

Comparando los resultados obtenidos con los otros métodos, y el método antes mencionado, el método de lixiviación alcalina usando NaOH y Na₂S, es el más efectivo, ya que tiene una alta recuperación de arsénico, permitiendo que los concentrados contaminados con arsénico tengan un mejor valor en el mercado de metales, obteniendo mejores precios de venta.

4.2 Conclusiones:

Se realizó el análisis comparativo de los métodos hidrometalúrgicos empleados para la limpieza de concentrados de cobre que contienen arsénico, el cual se concluye que el método más eficiente es la lixiviación alcalina usando NaOH y Na₂S, con una recuperación del 97.8% de arsénico.

Se logró describir los diferentes métodos hidrometalúrgicos empleados para la limpieza de concentrados de cobre que contienen arsénico, mostrando tablas de resultados por cada uno de ellos para determinar qué tan efectivos son según las variables de análisis.

Se comparó los métodos hidrometalúrgicos más eficientes empleados para la limpieza de concentrados de cobre que contienen arsénico. Por un lado, se tiene a la lixiviación alcalina usando NaOH y Na₂S y por otro lado la lixiviación alcalina en caliente utilizando NaOH y Na₂S en un concentrado de enargita, siendo los mejores métodos según su remoción de arsénico.

Se analizó las características de los concentrados de cobre con mínimos contenidos de arsénico para su comercialización, el cual con el método de lixiviación alcalina usando NaOH y Na₂S y la lixiviación alcalina en caliente utilizando NaOH y Na₂S en un concentrado de enargita, contienen 0.05% y 0.13% de arsénico en concentrado de cobre.

Se recomienda seguir con las investigaciones con respecto a la remoción de arsénico en concentrados de cobre, usando métodos pirometalúrgicos.

REFERENCIAS

- Alvarado Davila, C & Placencia Fernandez, O. (2016). *“Influencia de la dosificación de los colectores ap-3418 y ar-404 sobre la recuperación de plomo y zinc por flotación selectiva de un mineral polimetálico de la empresa minera occidental 2 de Cajamarca S.R.L. [Tesis para optar el título profesional de ingeniero de minas]. Repositorio de la Universidad Privada del Norte.*
<http://hdl.handle.net/11537/9952>
- Arboleda Reyes, S, Sagastegui Delgado, L (2019). *Factores determinantes en la evolución de las exportaciones de concentrado de cobre, en el marco del TLC Perú-China, entre los años 2009 al 2017.* [Tesis para optar el título profesional de Licenciado en Negocios Internacionales]. Repositorio de Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.
<http://hdl.handle.net/10757/626014>
- Azañero Castillo, G & Gutiérrez Vargas, E. (2016). *Efecto de la temperatura y del tiempo de lixiviación alcalina en caliente utilizando soda cáustica (NaOH) y sulfuro de sodio (Na₂S), sobre la extracción de As y el grado de concentración de Cu, Au y Ag de un concentrado de enargita (Cu₃AsS₄).* [Tesis para optar el título profesional de ingeniero metalurgista]. Repositorio de la Universidad Nacional De Trujillo.
<http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/8774>
- Bazán Brizuela. V. (2015). Eliminación de arsénico de concentrados de cobre. Revista SAM, (3), 4-10.
<http://materiales-sam.org.ar/sam/revista-sam/>

Ecometales Limited, (2019). Proyecto lixiviación de concentrados de cobre PLCC, Ecometales Limited Filial Codelco.

<https://www.ecometales.cl/operaciones-y-proyectos/lixivacion-de-concentrados-de-cobre-plcc>

Garcés Valenzuela, M. (2011). *Análisis técnicos de la huella hídrica como indicador de sustentabilidad del uso del agua en la producción del concentrado de cobre en división el teniente de Codelco*. [Tesis para obtener el título profesional de ingeniero civil]. Repositorio de Universidad De Chile.

<http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104068>

Goldfields (2019). *Reporte integrado 2019 Goldfields en el Perú*, Goldfields.

<https://www.goldfields.com.pe/>

Hanni, M, Podestá, A (2019). Manipulación del precio del comercio internacional de productos del cobre: un análisis de los casos de Chile y el Perú. *Revista de la SEPAL* (127), 102-120.

<https://www.cepal.org/fr/node/49016>

Jerez Rivero, O, (2015). *Cinética de la lixiviación a presión de enargita en medio $FeSO_4-H_2SO_4-O_2$* . [Tesis para obtener el grado profesional de Doctor en Ingeniería Metalúrgica]. Repositorio de Universidad de Concepción.

<http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/1901>

- Landa Quilca, L. (2018). *Evaluación de la flotación del mineral de cobre para reducir el contenido de arsénico en concentrados de cobre en la compañía minera Casapalca – Unidad Americana – 2018*. [Tesis para obtener el título profesional de ingeniero metalurgista]. Repositorio de Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/761>
- Lobos Machuca, L. (2015). *Evaluación del uso de NaSH en el circuito de flotación selectiva de molibdeno de los Pelambres*. [Tesis para obtener el título profesional de ingeniero civil químico]. Repositorio de la Universidad de Chile, <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/137468>
- Llerena Huamaní, J. (2017). *“Eliminación de arsénico desde concentrados de cobre, en minera Nasca – Perú*. [Tesis para obtener el título profesional de ingeniero metalurgista]. Repositorio de Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/6556>
- Marroquín Medina, M. (2013). *Estudio técnico de la separación de en la flotación selectiva de plomo – cobre en la U.M Yauliyacu, empresa minera los Quenuales*. [Tesis para obtener el título profesional de ingeniero metalurgista]. Repositorio de Universidad Nacional de San Agustín, <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/2697>
- Mayorca Baldoceda, E. (2018). *Depresión del arsénico en la flotación selectiva de los minerales de cobre enargítico a nivel laboratorio – 2018*. [Trabajo de investigación]. Repositorio de Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/1377>

Méndez Muñoz, E. (2019). *Flotación selectiva de enargita desde un concentrado*

final de sulfuros de cobre de Collahuasi. [Tesis para optar al grado de magíster en ciencias de la ingeniería mención metalurgia extractiva]. Repositorio de Universidad de Chile.

<http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/102022>

Ministerio de Minería de Chile (2017). *Sulfuros Primarios: desafíos y oportunidades* (Registro propiedad intelectual N° 283439). Departamento de Minería de Chile, COCHILCO Ministerio de Minería.

https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/sulfuros%20primarios_desaf%C3%ADos%20y%20oportunidades.pdf

Ospino, Y. (2009). Una aproximación a la comercialización de la producción de los concentrados mineros. *Pensamiento Crítico*, (10), 141-162. <https://doi.org/10.15381/pc.v10i0.9129>

Puga Usucachi, E. (2014). *Lixiviación alcalina de arsénico contenido en el mineral cobre gris presente en concentrados de cobre del Centro del Perú*. [Tesis para obtener el título profesional de ingeniero químico]. Repositorio de Universidad Nacional Del Callao. <http://repositorio.unac.edu.pe/handle/UNAC/401>

Quijada Aranda, D & Carhuacusma Torre, C. (2019). “*Alternativa tecnológica para la reducción de arsénico por flotación de los minerales de cobre en la Compañía Minera Chungar S.A.C.*” [Tesis para optar el título profesional de ingeniero metalurgista y de materiales]. Repositorio de Universidad Nacional Del Centro Del Perú. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/5576>

Restrepo Baena, O, Bustamante Rúa, M, Gaviria Cartagena, A (2008). *Cuaderno de Pirometalurgia*. [Trabajo de investigación]. Repositorio de la Universidad Nacional de Colombia.

<https://minas.medellin.unal.edu.co/centro-editorial/cuadernos/cuaderno-de-pirometalurgia>

Rojas, R. (05 de marzo del 2020). María Delgado, Caudal Cobrizo. Diario Gestión. https://www.ulima.edu.pe/sites/default/files/news/file/maria-alejandra-delgado_05-03-2020.pdf

Ruiz, M, Bello, R, Padilla, R, (2013). Remoción de arsénico desde concentrados de cobre que contienen enargita. *Revista Metalúrgica* (33), 16-20. http://www.revistasbolivianas.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2078-55932013000200003&lng=es&nrm=iso

Saldarriaga, J. (26 de septiembre del 2016). María Delgado, Proyecto la Granja se Agrandando. Diario el Comercio. <https://elcomercio.pe/economia/dia-1/proyecto-cobre-granja-agrandando-263394-noticia/>

Sandoval Lara, P. (2020). *Propuesta técnica para el procesamiento de mineral polimetálico proveniente de la región de Coquimbo*. [Tesis para optar el título profesional de ingeniero de minas]. Repositorio de Universidad Andrés Bello – Chile. <http://repositorio.unab.cl/xmlui/handle/ria/14443>.

Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía, (2017). Valor de los concentrados de minerales. *Revista SNMPE*, (108), 1-4. https://issuu.com/sociedadminerioenergetica/docs/tema_de_interes_-_valor_de_los_conc

ANEXOS

Anexo 1: Instrumentos de recolección de datos

Instrumento 1: Formato para lixiviación con solución alcalina con NaHS y NaOH.

Prueba Experimental	Temperatura (°C)	Presión (Atmosferas)	pH	NaHS (g/l)	NaOH (g/l)	Tiempo de Lixiviación (Horas)	Concentración de arsénico (%)		% de remoción de arsénico
							inicial	final	
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									

Instrumento 2: Formato para porcentaje de remoción de arsénico en función a la concentración del agente lixiviante.

Tiempo (Horas)	Concentración(g/l)							
	(Na ₂ S - NaOH) (96-49.2)		(Na ₂ S - NaOH) (110-56.4)		(Na ₂ S - NaOH) (140-71.8)		(Na ₂ S - NaOH) (160-82.1)	
	% As Final	% Remoción	% As Final	% Remoción	% As Final	% Remoción	% As Final	% Remoción
0								
7								
8								
9								
10								

Instrumento 3: Formato para porcentaje de remoción de arsénico a diferentes temperaturas.

Tiempo (horas)	Temperatura 70 °C		Temperatura 80 °C		Temperatura 85 °C		Temperatura 90 °C	
	% As Final	% Remoción	% As Final	% Remoción	% As Final	% Remoción	% As Final	% Remoción
0								
7								
8								
9								
10								

Instrumento 4: Formato para porcentaje de Remoción de arsénico a diferentes densidades de pulpa.

Relación L/S	% As Final	% Remoción
2		
3		
4		

Instrumento 5: Formato comparativo del porcentaje de remoción de arsénico entre el concentrado de cobre gris inicial y final.

	% As	% Sb	Hg (ppm)	% Bi	% Cu	Oz/TM Ag	Oz/TM Au	% Zn	% Pb	% S
Inicio										
Lixiviación										
Δ										
% Δ										

Instrumento 6: Formato para porcentaje de remoción de arsénico en función de la temperatura

Temperatura (°C)	Ley de As (%)	Ley de Relave As (%)	% de remoción As	RPM	Dosificación de NaOH (Mol)	Dosificación de Na ₂ S (Mol)
70						
80						
90						

Instrumento 7: Formato para disolución del arsénico a diversas concentraciones (NaOH - Na₂S) vs tiempo.

Tiempo (Horas)	Ley de As (%)	Ley de Relave As (%)	Extracción As (%)
2			
3			
4			

Instrumento 8: Formato para porcentaje de remoción de arsénico con respecto al tiempo y Temperatura.

Tiempo (Horas)	Temperatura (°C)		
	70	80	90
2			
3			
4			

Instrumento 9: Formato para efecto de temperatura y tiempo de lixiviación alcalina.

Volumen de Solución (ml)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Remoción As (%)	Residuo As (%)	RPM
5					
5					

Instrumento 10: Formato para efecto de la concentración de NaOH y Na₂S en la solución de lixiviación alcalina.

Volumen Solución (ml)	Temperatura °C	Tiempo (Minutos)	Dosificación de Na ₂ S (Mol)	Dosificación de NaOH (Mol)	Remoción As (%)	RPM
4						
4						
4						

Instrumento 11: Formato para ley de concentrado y recuperación del cobre de las pruebas de flotación.

Prueba de Flotación.	Ley de cobre (%)	Leyes Químicas (% Cu)			Recuperaciones (% Cu)		
		1° L.	2° L.	Relave	1° L.	2° L.	Relave
5							
6							
7							

Instrumento 12: Formato para ley de concentrado y recuperación del arsénico de las pruebas de flotación.

Prueba de flotación.	Ley de Arsénico (%)	Leyes Químicas (% As)			Recuperaciones (% As)		
		1° L.	2° L.	Relave	1° L.	2° L.	Relave
5							
6							
7							

Instrumento 13: Formato para porcentaje de disolución del Arsénico utilizando NaOH y Na₂S en la flotación.

Prueba N°	NaOH (Mol/litro)	Na ₂ S (Mol/litro)	Disolución de As (%)		
			5 (min)	10 (min)	20 (min)
1					
2					
3					
4					
5					

Instrumento 14: Formato para porcentaje de disolución del arsénico a diversas revoluciones por minuto.

Prueba N°	RPM	Disolución de As (%)		
		5 (min)	10(min)	20 (min)
1				
2				
3				
4				
5				

Instrumento 15: Formato para efecto del tamaño de partícula en la disolución de arsénico.

Prueba N°	Tamaño de Partícula (Micrones)	Disolución de As (%)		
		5 (min)	10 (min)	20(min)
1				
2				
3				

Instrumento 16: Formato para análisis químico promedio después de las pruebas experimentales.

Mineral	Antes de tratamiento	Después de tratamiento	Disolución (%)
Cu			
Fe			
As			
Sb			
Ag Oz/TC			

Anexo 2: Instrumentos de análisis de datos

Instrumento 17: Comparación de los métodos de lixiviación para limpieza de concentrados de cobre con arsénico.

Comparativo de los estudios de lixiviación		
	INSTRUMENTO	Tiempo (Hr) Remoción (%)
Lixiviación alcalina con NaHS	A	
Remoción de arsénico a diferentes temperaturas	B	
Nivel de remoción de arsénico con agente lixivante	C	
Remoción de arsénico a diferentes densidades de pulpa	D	
Extracción de arsénico (%) con respecto al tiempo y Temperatura	E	
Efecto de la concentración de NaOH y Na ₂ S en la solución de lixiviación alcalina.	F	

Instrumento 18: Comparativo de los estudios de flotación en la limpieza de concentrados de cobre con arsénico.

Comparativo de los estudios de flotación	
Método	Remoción As (%)
Disolución de arsénico en flotación selectica	
Flotación de minerales	

Instrumento 19: Comparativo del método más eficiente en la limpieza de concentrado de cobre con arsénico.

Comparativo de los dos métodos usados para la limpieza de concentrados de cobre con arsénico

Método

Remoción de As (%)

Efecto de la concentración de NaOH y Na₂S en la solución de lixiviación alcalina.

Disolución de arsénico en flotación selectica

Anexo 3: Variaciones de las condiciones operativas en función de observaciones y los resultados de las pruebas con fines de encontrar las condiciones óptimas.

PRUEBA DE FLOTACIÓN	VARIACIONES DE LAS CONDICIONES OPERATIVAS EN FUNCIÓN DE OBSERVACIONES Y LOS RESULTADOS DE LAS PRUEBAS CON FINES DE ENCONTRAR LAS CONDICIONES ÓPTIMAS.
P.F-01	Establecimiento de la prueba estándar.
P.F-02	Molienda: Aumento de cal (5 Kg/TM), Aumento del NaCN (80 gr/TM) F, Ro: Sin Xantato Z-11, Aumento de Aerophine 3418 A (70 gr/TM) F. Scv: Uso del Aerophine 3418 A (15 gr/TM), Sin Xantato Z-11. Molienda: Bajar la cal (2 Kg/TM). F. Ro: Aumento de cal (11.80 Kg/TM). Uso del Xantato Z-11 (50 gr/TM). Bajar el Aerophine 3418 A (10 gr/TM)
P.F-03	F. Scv.: Aumento del Aerophine 3418 A (25 gr/TM) F. Ro: Bajar la cal (8.0 Kg /TM)
P.F-04	F. Scv: Bajar el Aerophine 3418 A (20 gr/TM) Uso del Xantato Z-11 (25 gr/TM) 1ra L. Cu: Uso del NaCN (20 gr/TM) 2da L. Cu: Uso del NaCN (20 gr/TM) Molienda: Aumento del NaCN (80 gr/TM) Aumento de cal (5 Kg/TM)
P.F-05	F. Ro: Aumento de cal (10 Kg/TM), Aumento del NaCN (20 gr/TM)

P.F-06

F. Scv.: Sin Aerophinee 3418 A 1ra L. Cu: Bajar el NaCN (10 gr/TM) 2da L. Cu: Bajar el NaCN (10 gr/TM)

Molienda: Aumento del mineral (1100 gr), Aumento del agua (550 cc) Uso del complejo $\text{Na}_2\text{Zn}(\text{CN})_4$ (50 % - 50 %) (182 gr/TM) Aumento de cal (7.27 Kg/TM)

Bajar el tiempo de molienda (19 min.)

Bajar el grado de molienda % - 200 mallas (88%)

F. Ro-Scv: Sin NaCN

Aumento de cal (14.5 Kg/TM) Aumento de Xantato Z-11 (55 gr/TM)

Aumento de Aerophine 3418 A (28 gr/TM) Aumento del Espumante MIBC (55 gr/TM)

Bajar tiempo de acondicionamiento (10 min.) Aumento del tiempo de flotación (10 min.)

1ra L. Cu: Uso del complejo $\text{Na}_2\text{Zn}(\text{CN})_4$ (50 % - 50 %) (45 gr/TM) Uso de cal (11.8 Kg/TM), Uso del Xantato Z-11 (5 gr/TM) Aumento del Espumante MIBC (6 gr/TM)

2da L. Cu: Uso complejo $\text{Na}_2\text{Zn}(\text{CN})_4$ (50 % - 50 %) (45 gr/TM) Uso de la cal (11.8 Kg/TM)

Molienda: Bajar tiempo de molienda (14.5 min.), 80 % -200 mallas.

P.F-07

F. Ro-Scv: Aumento de Xantato Z-11 (73gr/TM) 1ra L. Cu: Bajar la cal(0.54gr/TM)

Uso del Xantato Z-11 (9 gr/TM) 2da L. Cu: Bajar la cal (0.54 gr/TM)

Aumento Espumante MIBC (17 gr/TM)